



УДК 536.46:621.438

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ МЕТАНА В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ГТД ДГ-90

## NUMERICAL SIMULATION OF METHANE COMBUSTION PROCESS IN COMBUSTION CHAMBER OF GAS TURBINE ENGINE DG-90

**Фуников Владимир Николаевич**, магистрант каф. «Турбины и двигатели», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: new.oyu@mail.ru. Тел.: +79826374205

**Недошивина Татьяна Анатольевна**, канд. техн. наук, доцент каф. «Турбины и двигатели», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: tansha2000@mail.ru. Тел.: +79501912634

**Vladimir N. Funikov**, Master student, Department «Turbines and engines», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Russia, 620002, Yekaterinburg, Mira St., 19. E-mail: new.oyu@mail.ru. Ph.: +79826374205

**Tatyana A. Nedoshivina**, Dr., Assoc. Prof. Department «Turbines and engines», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Russia, 620002, Yekaterinburg, Mira St., 19. E-mail: tansha2000@mail.ru. Ph.: +79501912634

**Аннотация:** В работе рассматриваются основные этапы моделирования процесса горения в камере сгорания конвертированного судового двигателя ДГ-90 в составе ГПА-Ц1-16С. Производится анализ результатов расчёта, для подтверждения данных диагностирования процесса разрушения узлов камеры сгорания. Выполняется верификация расчёта по концентрациям выбросов СО и NO, замеренным на работающем агрегате.

**Abstract:** The paper considers the main stages of numerical modeling of the combustion process in the combustion chamber of the marine gas turbine engine DG-90. DG-90 is a part of gas turbine plant GPA-C1-16S. The article also analyzes the calculation results used to confirm the diagnosis data of the destruction process of the combustion chamber assemblies. Finally, verification of the calculation of CO and NO emission concentrations measured at the operating engine is performed.

**Ключевые слова:** камера сгорания; разрушение; пульсационное горение; поле температур; охлаждение.

**Keywords:** combustion chamber; destruction; pulse combustion; field temperature; cooling.

### ЦЕЛЬ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА В КС ГТД ДГ-90

Анализ причин отказов газоперекачивающего агрегата ГПА-Ц1-16С с конвертированным судовым двигателем ДГ-90 позволяет выявить несколько узлов, которые являются причиной серьёзных отказов и повреждений. Одним из таких узлов является малоэмиссионная камера сгорания двигателя. Прогары жаровых труб, пламяперекидных патрубков обнаруживаются на остановленном агрегате при наработке 12 тыс. часов. Причиной таких повреждений является нарушение процесса горения в КС вследствие изменения температурного режима работы жаровых труб, приводящего к местным перегревам, которые обуславливают неравномерное поле температур перед сопловым аппаратом ТВД.

Результаты диагностирования КС на одном из агрегатов компрессорной станции «Юбилейная» позволили определить, что газодинамическое возбуждение объёма продуктов сгорания в малоэмиссионной камере сгорания двигателя ДГ-90 происходит в осевом направлении и, по-видимому, связано с различиями в давлениях и температурах компонентов газозооной смеси, вызванными различными подачами топлива и воздуха. В результате чего происходит разрушение камеры сгорания из-за пульсационного горения на определённых режимах работы двигателя.

Следовательно, целью моделирования процесса горения в КС является проверка равномерности поля температур на выходе из КС, а также выявление зон или участков с наибольшей температурой, приводящей не только к вероятным локальным перегревам стенок жаровой трубы или смесителя, но и к увеличению выбросов NO и CO.

## СОЗДАНИЕ ТРЁХМЕРНОЙ РАСЧЁТНОЙ ОБЛАСТИ КС

Построение 3D модели КС, которая в дальнейшем рассчитывается в ANSYS CFX, осуществляется в программе SolidWorks. Результат построения КС показан на рис. 1.

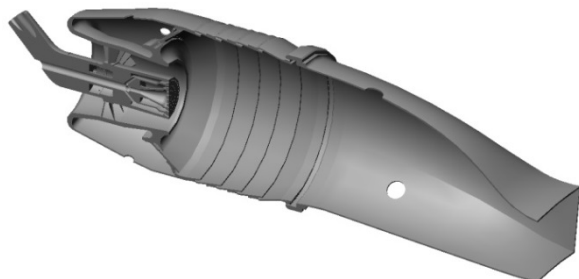


Рис. 1. Разрез жаровой трубы ГТД ДГ-90

Получившаяся геометрическая модель упрощается, за счёт удаления мелких элементов или узлов, не имеющих особого влияния на точность вычислений моделируемого процесса (например, скругляются острые кромки, упрощаются каналы форсунок).

Далее создается так называемое «антитело» (выделение газодинамической области). Данная область изображена на рис. 2.

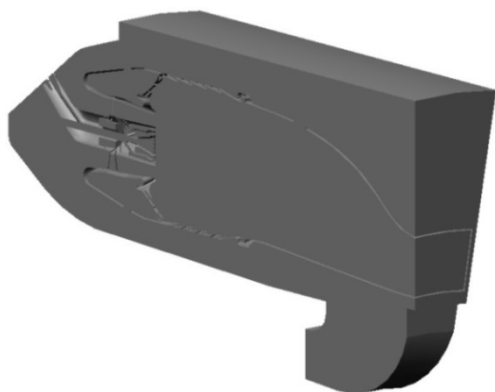


Рис. 2. Разрез газодинамической области расчёта КС ГТД ДГ-90

Расчёт выполняется только для одной части расчётной области. Основным требованием к данной области КС является её периодичность относительно оси вращения турбины или плоскостей симметрии.

## СОЗДАНИЕ СТЕКИ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ РАСЧЁТНОЙ ОБЛАСТИ КС

При создании сетки конечных элементов в ICEM CFD, расчётная область разбивается на требуемое количество семейств поверхностей. Каждому семейству задаются определённые параметры сетки конечных элементов Otree, которые отвечают за её качество. Необходимо следить за целесообразностью размеров элементов в определенных местах. Так для отверстий

перфорированной стенки жаровой трубы, применяется более мелкая структура сетки (см. рис. 3).

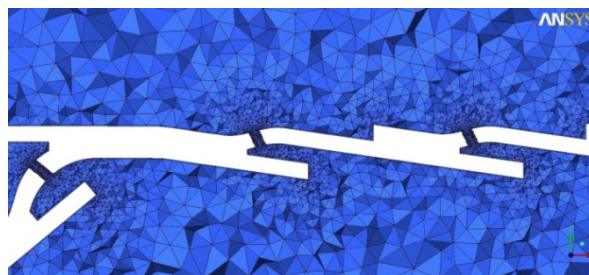


Рис. 3. Структура сетки отверстий жаровой трубы КС

В данной задаче внутри расчётной области было задано локальное увеличение значения плотности сетки, а именно в месте распыла топлива с целью приближения результатов расчёта к реальным процессам, проходящим в камере сгорания (см. рис. 4).

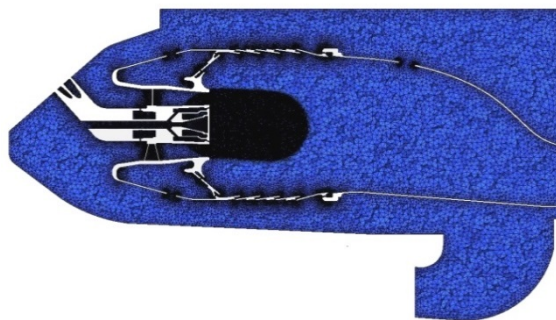


Рис. 4. Результат построения сетки конечных элементов расчётной области КС

Так как объёмные элементы, построенные по алгоритму Otree, имеют преимущественные направления, то при решении уравнений для этих элементов выходные данные будут обладать некоторым смещением вдоль этих направлений, что приведет к некорректному решению и к не точному отображению результатов расчёта. Вследствие этого, генерируется сетка без выраженных направлений, создаваемая по алгоритму Delaunay. Для её построения удаляются объёмные элементы, кроме поверхностной сетки. После генерации сетки Delaunay, оставшаяся сетка сглаживается и проверяется на ошибки. Завершающим этапом подготовки сеточной модели является создание трёхслойного призматического слоя вдоль всех стенок. Чем меньше будут элементы призматического слоя, тем достоверней параметры потока в пристеночной области. После генерации призматического слоя производится сглаживание тетраэдральной объёмной сетки, призматический слой «замораживается», во избежание сильного искажения призматических элементов.

## ЗАДАНИЕ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ

После импорта сетки в ANSYS CFX-Pre, в библиотеку материалов добавляются реагирующие вещества, в нашем случае, это метан и различные продукты его окисления, выбирается тип реакции Methane Air FLL STP и модель горения PDF Flamelet, при которой процесс горения возникает сразу после смешения достаточного количества топлива и воздуха. В свойствах расчётной области и модели жидкости Fluid Models, задаётся модель турбулентности k-Epsilon, которая характеризуется определёнными подходами к математическому описанию и решению крупных вихревых течений.

После этого настраивается периодичность расчётной области относительно оси вращения двигателя, указываются поверхности входа и выхода и задаются граничные условия для них. К оставшимся поверхностям применяется условие непроницаемой стенки.

Параметры воздуха на входе в КС:

- $T = 693 \text{ K}$
- $P = 1,95 \text{ МПа}$

Параметры топливного газа на входе в КС:

- $T = 323 \text{ K}$
- $P = 2,94 \text{ МПа}$

Массовый расход продуктов сгорания на выходе из КС через 1/16 часть:

- $G = 4,375 \text{ кг/с}$

Создаются пользовательские мониторы, с помощью которых можно проследить за параметрами, меняющимися во время решения. Отслеживаемые параметры могут быть различными, например: давление, температура, расход, коэффициент вязкости, скорость и т. д. В процессе решения была создана точка монитора позволяющая контролировать среднемассовый расход  $\text{CO}_2$  на выходе из расчётной области КС. Стоит отметить, что настройки мониторов являются одной из мер при сходимости решения.

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЁТА

Основной неисправностью камер сгорания является прогар жаровой трубы, которой может возникнуть при повышенных температурах, вследствие нагарообразования при неполном сгорании топлива, приводящему к местному перегреву стенок. Повышение температуры в камере сгорания является следствием нарушения процесса смесеобразования при увеличении количества топлива или расхода воздуха, поступающего в камеру сгорания. Разрушение КС может произойти из-за пульсационного горения, обусловленного различными подачами топлива и воздуха.

Анализируя полученные данные расчёта КС, в первую очередь обращают внимание на поля распределения температур в продольном и выходном сечениях, которые в идеальном случае должны быть равномерными. Если средние значения основных параметров давления и температуры на выходе из КС, изображённые соответственно на рис. 5, лежат в интервале экспериментальных значений, то можно считать, что расчёт выполнен с удовлетворительной точностью.

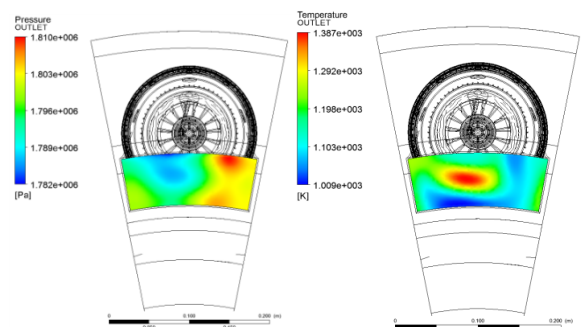


Рис. 5. Распределение давления и температуры на выходе из КС

В продольном сечении камеры сгорания распределение поля температур (см. рис. 6) представляет более приемлемую картину.

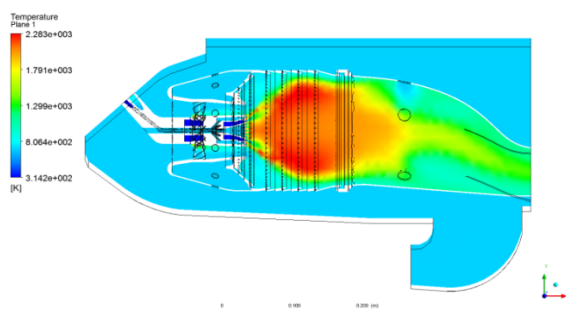


Рис. 6. Распределение поля температур по длине жаровой трубы КС

Не наблюдается разрывов охлаждающего пристеночного слоя, либо «проскока» факела в зону смешения. Однако, в процессе эксплуатации происходят засорение отверстий в жаровой трубе, что приводит к нарушению охлаждения. Пламя в данном месте начинает «прилипать» к стенке, образуя зону прогара. Чего нельзя сказать о распределении поля температур на выходе из КС, с ярко выраженной зоной повышенной температуры (см. рис. 5). Такая неравномерность поля температур вызывается технологическими различиями в расходах первичного воздуха и топлива по окружности, а так же дополняется искривлениями температурного поля по радиусу. Кроме этого, усиление разброса температур возможно в зоне разбавления продуктов сгорания вторичным воздухом. Что подтверждает результаты диагностирования процесса разрушения КС, вызванные непропорциональным



распределением первичного и вторичного воздуха, вызывая газодинамическое возбуждение объёма продуктов сгорания в камере сгорания в осевом направлении. В процессе эксплуатации ГТД неравномерность температуры на выходе из КС возрастает, и обусловлена неисправностью газовых горелок.

Существенным источником возмущения давления в жаровой трубе, в диапазоне частот 130-150 Гц, являются турбулентные пульсации. Этот источник колебаний влияет на скорость распространения пламени. Поэтому в малоэмиссионных камерах сгорания с обедненными смесями турбулентные процессы играют значительную роль в нарушении устойчивости горения [1]. Для рассматриваемой жаровой трубы максимальные турбулентные пульсации (линии тока окрашены пропорционально давлению) возникают в районе выхода потока из каналов завихрителя и усиливаются в зоне смешения (см. рис. 7).

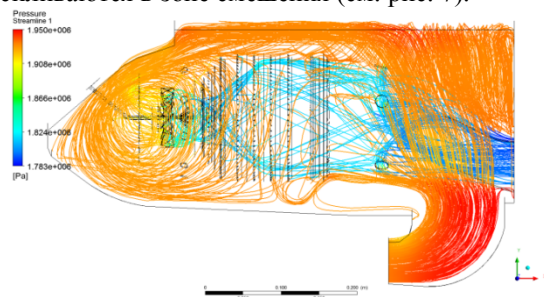


Рис. 7. Турбулентные пульсации давлений газовой смеси в жаровой трубе

Следовательно, в реальной жаровой трубе возникает вибрационное горение, сопровождающееся колебаниями элементов конструкции КС и звуковыми эффектами. Таким образом, пульсационное горение вызывает осевую вибрацию ротора всего двигателя в целом либо его газогенераторной части.

Одно из основных требований предъявляемых к камерам сгорания является экологичность их работы, т.е. содержание вредных веществ CO и NO находящихся в продуктах сгорания должно удовлетворять [2]. Рассмотрим поля массовой концентрации CO и NO (см. рис. 8, 9) в продольном сечении КС.

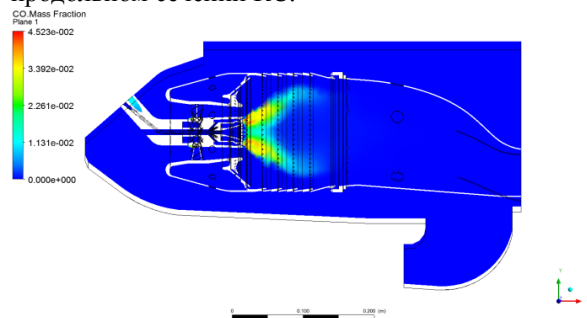


Рис. 8. Поле распределения массовой концентрации CO

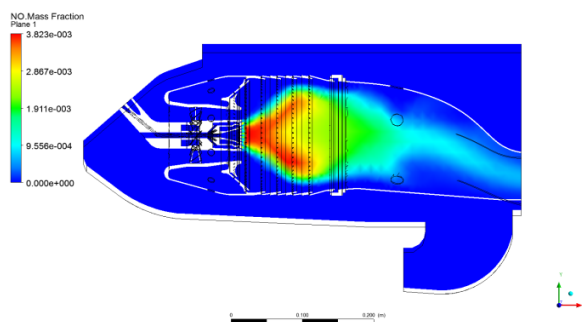


Рис. 9. Поле распределения массовой концентрации NO

Известно, что окись углерода CO образуется вследствие:

- неполного сгорания топлива в сильно обедненных топливно-воздушных смесях
- нехватки кислорода при горении богатых смесей
- диссоциации  $\text{CO}_2$  при высоких температурах.

Окисление CO идет относительно медленно, что является фактором, определяющим увеличение времени пребывания, необходимого для завершения реакций. Однако, снижение выбросов CO трудно реализовать в малоэмиссионных камерах сгорания, т.к. они ведут к резкому увеличению образования  $\text{NO}_x$ . Оксиды азота  $\text{NO}_x$  образуются в результате окисления азота, находящегося в атмосферном воздухе и в топливе. Оксид азота NO образуется только в горячих зонах (см. рис. 9). Окисление NO до  $\text{NO}_2$  происходит при снижении температуры газа. Установлено, что выброс  $\text{NO}_x$  экспоненциально возрастает с повышением температуры пламени и линейно возрастает с повышением времени пребывания продуктов сгорания в высокотемпературных зонах [3].

Для снижения уровня эмиссии  $\text{NO}_x$  используются следующие подходы:

- снижение температуры в зоне горения;
- выбор оптимального значения  $\alpha_B$ ;
- уменьшение времени пребывания топливной смеси в зоне горения.

## ВЕРИФИКАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЁТА

По результатам расчёта процесса горения в КС ГТД ДГ-90 была произведена верификация [4] по концентрации выбросов CO и NO, замеренным на работающем агрегате (см. табл. 1).

Расчёт в ANSYS CFX позволяет определить плотность продуктов сгорания  $\rho_{\text{за КС}} = 5,18 \text{ кг/м}^3$ , температуру  $T_{\text{за КС}} = 1163 \text{ K}$  и давление  $P_{\text{за КС}} = 1,81 \text{ МПа}$  на выходе из КС. Исходя из формулы Менделеева – Клапейрона, для расчёта определяется константа:

$$\frac{R}{M} = \frac{P_{за\ КС}}{\rho_{за\ КС} \cdot T_{за\ КС}} = \frac{1,81}{5,18 \cdot 1163} = 0,277 \cdot 10^{-3} \frac{МПа}{\frac{кг}{м^3} K}$$

Зная атмосферное давление  $P_{АТМ} = 0,1013$  МПа и температуру  $T_{АТМ} = 288$  К при нормальных физических условиях, а так же температуру продуктов сгорания на срезе выхлопной трубы  $T_{ср\ ВТ} = 703$  К и массовый расход продуктов сгорания на срезе выхлопного патрубка турбины  $G_{ср\ ВПТ} = 70$  кг/с на номинальном режиме работы агрегата, рассчитываются:

– плотность продуктов сгорания на срезе выхлопной трубы  $\rho_{ср\ ВТ}$ :

$$\rho_{ср\ ВТ} = \frac{P_{АТМ}}{\frac{R}{M} \cdot T_{ср\ ВТ}} = \frac{0,1013}{0,277 \cdot 10^{-3} \cdot 703} = 0,52 \frac{кг}{м^3}$$

– объёмный расход продуктов сгорания на срезе выхлопной трубы  $Q_{ср\ ВТ}$ :

$$Q_{ср\ ВТ} = \frac{G_{ср\ ВПТ}}{\rho_{ср\ ВТ}} = \frac{70}{0,52} = 134,6 \frac{м^3}{с}$$

– объёмный расход на срезе выхлопного патрубка турбины  $Q_{ср\ ВПТ}$ :

$$Q_{ср\ ВПТ} = \frac{Q_{ср\ ВТ} \cdot T_{АТМ}}{T_{ср\ ВТ}} = \frac{134,6 \cdot 288}{703} = 55,1 \frac{м^3}{с}$$

Стоит отметить, что значения  $Q_{ср\ ВТ} = 134,6$  м<sup>3</sup>/с и  $Q_{ср\ ВПТ} = 55,1$  м<sup>3</sup>/с получившиеся в результате расчёта, удовлетворяют значениям взятых из каталога выбросов [2] для нашего агрегата, которые составляют  $Q_{ср\ ВТ} = 141,1$  м<sup>3</sup>/с и  $Q_{ср\ ВПТ} = 54,8$  м<sup>3</sup>/с соответственно.

Через функцию massFlowInt калькулятора CFX, определяется массовый расход  $G_{CO} = 5,3$  мг/с и  $G_{NO} = 1,1$  мг/с на выходе из КС. Только после этого, зная плотность продуктов сгорания на срезе выхлопной трубы, а так же количество жаровых труб определяются объёмные концентрации СО и NO:

$$Q_{CO} = \frac{Q_{ср\ ВТ} \cdot 16}{\rho_{ср\ ВТ}} = \frac{5,3 \cdot 16}{0,52} = 163,1 \frac{мг}{м^3}$$

$$Q_{NO} = \frac{Q_{ср\ ВТ} \cdot 16}{\rho_{ср\ ВТ}} = \frac{1,1 \cdot 16}{0,52} = 33,9 \frac{мг}{м^3}$$

Для наглядности значения параметров концентрации СО и NO полученных в результате расчёта, а также замеров произведённых на КС «Юбилейная» одного из двигателей ДГ-90 во время работы представлены в табл. 1.

Таблица 1.

Значения параметров концентрации СО и NO

Результаты замеров		Результаты расчёта	
СО	206,6 мг/м <sup>3</sup>	СО	163,1 мг/м <sup>3</sup>
NO	47,3 мг/м <sup>3</sup>	NO	33,9 мг/м <sup>3</sup>

Как видно из табл. 1 результаты расчёта во многом отличаются от результатов замеров. Однако прослеживается их соотношение между собой на качественном уровне. Большая разница

между результатами замеров и данными расчёта концентраций СО и NO определена зависимостью результатов замеров от погодных условий. Замеры проводились при температуре наружного воздуха  $T_{АТМ} = 273$  К и давлении  $P_{АТМ} = 0,097$  МПа. Кроме этого, данная разность обусловлена ещё следующими факторами:

- возможным загрязнением отверстий в форсунках, либо отверстий жаровых труб камеры сгорания двигателя на котором проводились замеры;
- содержанием СН<sub>4</sub> в природном газе на уровне 95-98%, когда при расчёте был выбран чистый СН<sub>4</sub>;
- выбрана не соответствующая модель реакции из библиотеки данных ANSYS CFX-Pre;
- задана не подходящая модель горения при задании граничных условий.

Таким образом, необходимо детально рассмотреть вопрос задания граничных условий, для получения более достоверных данных по результатам расчёта концентраций СО и NO. Задание граничных условий требует индивидуальной настройки и зависит от режима работы двигателя, для которого выполняется расчёт КС. Так в нашем случае был принят переменный режим работы, который, как оказалось, не позволяет выявить потенциальные зоны прогаров жаровой трубы, так как заведомо не смоделированы места возможного загрязнения отверстий перфорированных стенок, где нарушается их охлаждение. Однако, удалось подтвердить результаты диагностирования по возникновению вибрации элементов камеры сгорания, вызванной большой разницей давлений и температур газовой смеси, непропорциональным распределением первичного и вторичного воздуха. Совпадение частоты газодинамического возбуждения с собственной частотой крупного жарового элемента КС при продолжительной эксплуатации приводит к его усталостному разрушению.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Матвеев С.Г., Ланский А.М., Орлов М.Ю. Моделирование процесса горения метана при переводе КС на газообразное топливо. Самара: СГАУ им. С.П. Королёва, 2011, 11 с.
2. СТО Газпром 2-1.19-332-2009. Технические нормативы выбросов. Газоперекачивающие агрегаты «Газпром». Москва, ВНИИГАЗ, 2009.
3. Матвеев С.Г., Лукачев С.В., Орлов М.Ю. Расчет образования СО и NO<sub>x</sub> в камерах сгорания ГТД. Самара: СГАУ им. С.П. Королёва, 2012, 76 с.
4. Ахмедзянов Д.А., Баулин О.А., Кишалов А. Е. Верификация процесса горения и оценка полноты сгорания в КС авиационных газотурбинных двигателей. Уфа: УГАТУ, 2011, 230-236 с.